

晚全新世东亚季风高分辨率沉积记录： 来自东海内陆架泥质区的证据

徐 军^{1,2,3}, 石学法^{1,2,3*}, 刘升发^{1,2,3}, 刘建兴^{1,2,3}, 单 新^{1,2,3}, 董 智^{1,4}

(1.国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2.海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

3.青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237;

4.南京大学 地理与海洋科学学院南海协同创新中心, 江苏 南京 210023)

摘 要: 对位于东海内陆架泥质区的 MZ05 孔浅钻岩芯进行粒度、常微量元素、AMS¹⁴C 测年分析, 获得 2.90—1.80 ka B.P. 期间粒度和常微量元素随时间变化的高分辨率曲线。综合分析 MZ05 孔地球化学元素比值(CIA, Rb/Sr) 曲线发现沉积物源区的化学风化强度变化可以分为 3 个阶段: 2.90—2.70 ka B.P. 的增强期, 2.64—2.35 ka B.P. 的减弱期和 2.35—1.80 ka B.P. 的较弱期, 反映该段时间内东亚夏季风的强弱变化。MZ05 孔的沉积物敏感粒级(1.2~22.1 μm) 平均粒径指示晚全新世东亚冬季风波动频繁, 呈现出 3 个各具特点的阶段: 2.90—2.65 ka B.P. 属于中等频率波动的冬季风强盛期; 2.64 ka B.P. 左右东亚冬季风由强转弱, 2.60—2.35 ka B.P. 冬季风先减弱后增强; 2.35—1.82 ka B.P. 为相对稳定的冬季风弱期。东亚冬季风的演化趋势在其他气候记录中也发现相应的降温证据, 揭示全球气候变化的区域性响应。研究同时发现晚全新世研究区东亚冬、夏季风在百年尺度上呈现反相位关系。

关键词: 敏感粒级; 化学风化; 高分辨率; 东亚季风; 泥质区; 东海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)02-0216-13

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.02.007

陆架边缘海作为大陆和海洋的结合部和相互作用带, 对全球海平面升降、河道变迁和气候变化等因素的演化极为敏感, 陆架泥质区作为陆源物质的“汇”, 是记录陆架地区水动力格局和气候环境变化的重要载体^[1-2]。长江作为世界第三大河流, 其历史年均入海沉积物通量达到 $4.8 \times 10^8 \text{ t}^{[3]}$, 每年的 6—9 月是长江的汛期, 河口地区的沉积速率可以达到每月 4 cm, 可是反映到同区域的历史沉积记录中却出现数量级的降低, 每年只有 1~5 cm^[4], 沉积速率的差异表明大量的沉积物被季节性再悬浮并搬运到其他地区^[3,5]。研究发现长江运输的沉积物夏季受台湾暖流阻隔作用, 入海沉积物通量 70%~90% 堆积于长江口及东海内陆架(水深<50 m), 冬季由于沿岸流的增强, 部分长江沉积物在沿岸流驱动下沿基本平行于海岸线的方向由东北向西南运移, 最终可达闽江口^[6-8]。东海内陆架泥质沉积体沉积速率高、沉积连续性好、记录的环境信息丰富, 具备进行高分辨率古海洋研究的优越条件, 为我们了解东亚季风的演化提供可能。

由于海陆热力性质的差异, 从副热带海洋吹向陆地的夏季风造成东亚地区夏季的湿润气候, 冬季在西伯利亚高压与阿留申低压的相互作用下盛行干燥的冬季风^[9-10]。黄土粉尘组分记录包含过去东亚环境的变化信息, 其粒度、粉尘通量和相间的古土壤的磁化率值、有机质含量分别指示东亚冬、夏季风的强弱, 在长时间尺度东亚季风的演化中佐证众多举世瞩目的重大研究成果^[11-12]。在过去的几十年间, 通过对石笋^[13]、冰芯^[14]、泥炭^[15]、孢粉^[16]、树轮^[17]、湖相沉积物^[18]的分析, 获得大量高精度古气候记录。目前, 海洋古环境研

收稿日期: 2017-12-25

资助项目: 全球变化与海气相互作用专项——亚洲大陆边缘“源—汇”过程与陆海相互作用(GASI-GEOGE-03); 国家自然科学基金委-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目——海洋地质过程与环境(U1606401)

作者简介: 徐 军(1992-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积方面研究. E-mail: 448279011@qq.com

*** 通讯作者:** 石学法(1965-), 男, 山东潍坊人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事海洋沉积学与海底成矿作用方面研究. E-mail: xfshi@fio.org.cn

(高 峻 编辑)

究随着技术手段的改善,针对陆架地区沉积物指示东亚季风的研究也取得长足进步^[19-23],然而与陆地气候指标相比,海洋古气候记录的分辨率仍然偏低。我们基于东海陆架高分辨率的沉积记录研究晚全新世东亚季风的变化,并与其他气候指标进行比对,提升对晚全新世中国东部区域东亚季风变化的理解。

1 材料与方 法

MZ05 孔由国家海洋局第一海洋研究所研究人员乘坐上海海洋石油局第一海洋地质调查大队“勘 407”号于 2015 年执行“全球变化与海气相互作用”专项在东海内陆架泥质区获得,钻孔位置($121^{\circ}33'E, 27^{\circ}00'N$)见图 1,水深 69.8 m,岩芯进尺 40.99 m,平均取芯率为 90%,岩芯保存于国家海洋局第一海洋研究所 4℃样品库。岩芯剖开并进行拍照描述,以 2 cm 等厚度取样,取样间隔为 10 cm,总共分析 361 个粒度和常量元素样品,挑取底栖混合种有孔虫样品进行测年,获得 8 个有效年龄控制点。

粒度分析:取适量样品置于烧杯中,先加入 15 mL 体积分数为 15% 的双氧水浸泡 24 h 去除有机质,再加入 5 mL 体积分数为 10% 的稀盐酸浸泡 48 h 去除沉积物中的钙质胶结物以及贝壳碎屑,反应完全后反复离心(每次 3 500 r/min;10 min)、洗盐直至溶液呈中性,经超声波振荡分散后上机测试,所用仪器为 Master Sizer 2000 型激光粒度仪(英国 Malvern 公司生产),测量范围为 $0.02\sim 2\,000\ \mu\text{m}$,粒级分辨率为 $0.01\ \phi$,重复测量的误差 $<3\%$ 。

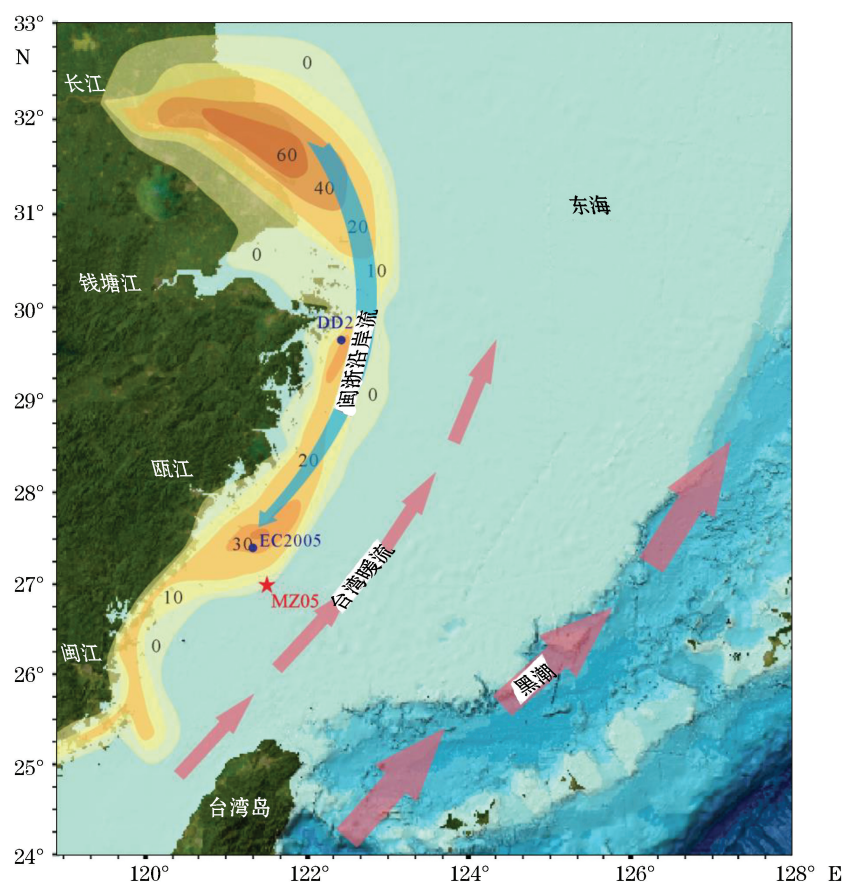


图 1 MZ05(★)和附近钻孔(●)位置以及海洋环流示意图(重绘自文献[3]和[8])

Fig. 1 Location of the sediment core MZ05 and regional circulation pattern in the East China Sea (modified after reference [3] and [8])

常微量元素分析:样品低温烘干后研磨至 200 目以下,精确称量 0.05 g 样品于 PTFE(聚四氟乙烯)内胆中,加入 1.5 mL 体积分数为 68%的硝酸,1.5 mL 体积分数为 48%的氢氟酸,1 mL 体积分数为 36%的盐酸后盖上密封盖放入不锈钢套内,置于烘箱在 190 ℃下加热 48 h。冷却后取出 PTFE 内胆,置于电热板上加热蒸干后,加入 1 mL 体积分数为 2%的硝酸蒸干(去除残余的氢氟酸和盐酸)。然后加入 4 mL 体积分数为 20%的盐酸和 0.5 mL 质量浓度为 1 μg/mL 的 Rh 内标。盖上密封盖放入不锈钢套内,置于烘箱在 150 ℃下加热 12 h。冷却后取出 PTFE 内胆,转移至 100 mL PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)瓶内,用体积分数 2%硝酸定容至 50 g,摇匀后待测,常量元素使用 ICAP6300 全谱直读电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Thermofisher Scientific 公司生产),微量元素使用 X Series 2 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermofisher Scientific 公司生产)分析测试,实验室测试分析过程中随机选取 10%平行样进行重复分析,并采用 GSD-9 标样(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所生产)进行校正,相对误差小于 0.5%。粒度和常微量元素分析测试工作在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室测试中心完成。

AMS¹⁴C 年龄测定选取底栖混合种有孔虫(表 1),挑样工作(开始于 2017-09)在国家海洋局第一海洋研究所进行,测试工作(2017-10 送样)在美国 BETA 实验室 AMS 年代测试中心完成。原始测年数据利用 BE-TACal 3.9 软件进行日历年龄校正^[24],ΔR(碳库校正)值取东海陆架平均值(121±25) a^[25]。

表 1 MZ05 孔 AMS¹⁴C 年代数据
Table 1 Accelerator mass spectrometry (AMS)¹⁴C ages of the Core MZ05

深度/m	实验室编号	AMS ¹⁴ C 年龄/ka B.P.	日历年龄/ka B.P.
0.02~0.04	Beta-460257	2.32±0.03	1.790
1.52~1.56	Beta-468025	2.41±0.03	1.904
2.36~2.40	Beta-460261	2.61±0.03	2.163
4.54~4.58	Beta-460260	2.78±0.03	2.363
9.42~9.46	Beta-460258	2.84±0.03	2.430
16.30~16.32	Beta-460251	2.97±0.03	2.600
18.46~18.50	Beta-460259	3.15±0.03	2.800
20.60~20.62	Beta-460255	3.28±0.03	2.950

2 结 果

2.1 岩性和年代地层

MZ05 孔岩性上下部差异较大,整体以灰色或深灰色黏土质粉砂、粉砂质砂为主,局部夹薄层细砂、砂质粉砂,偶见贝壳碎屑。按粒度变化可以分为 3 段:0~20 m(岩芯深度)为均一的黏土质粉砂,砂体积分数在整个岩芯中最低,小于 2%,且随深度变化较小。该段沉积物的粒度频率分布曲线基本类似,以一明显的单峰为主(图 2a);20~36 m(岩芯深度)砂的体积分数较上部岩芯有所增加,最高能达到 30%,随深度波动较大,反映环境条件的频繁变化,从粒度频率分布曲线上可以看出有明显的粗、细两个峰(图 2a),同时对 MZ05 孔进行岩性分析后发现,20 m 以下岩芯部分相较于上部岩芯存在大量变形结构、贝壳碎屑,推测该段可能属风暴沉积或其他类事件沉积;36~41 m(岩芯深度)定性为粉砂质砂,为整根岩芯中砂体积分数最高的区段,最高达到 80%,最低为 40%。考虑到沉积环境记录的稳定性和连续性,选择岩芯上部(0~20 m)进行古气候重建。

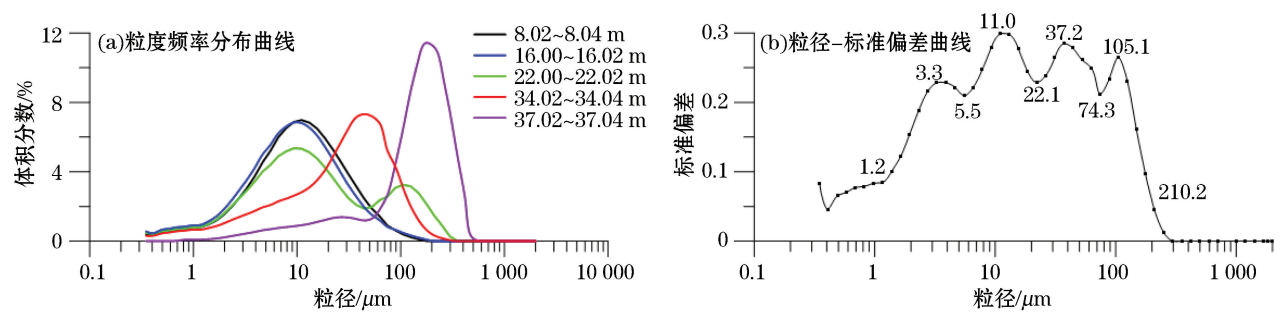


图 2 MZ05 孔不同深度粒度频率分布(左)与粒径-标准偏差曲线(右)

Fig.2 Grain-size frequency distribution curve (left) and grain size vs standard deviation curve (right) of the Core MZ05

MZ05 孔年代框架由表 1 中 8 个有效数据来确定,校正后日历年龄和深度的关系见图 3,直线斜率大且变化较小,MZ05 孔的沉积速率非常高,平均达 1.78 cm/a,沉积物取样厚度 2 cm,这样 MZ05 孔提供了 1.8—2.9ka B.P.平均分辨率高达 1.12 a 的高分辨率海洋沉积记录。关于岩芯表层近 1.8 ka 的沉积缺失的原因,我们认为可能是输入研究区沉积物的匮乏导致无沉积或者微量沉积,使得岩芯顶部年龄不为零。

2.2 粒度特征

MZ05 孔沉积物的平均粒径、分选系数、偏态和峰态 4 项粒度参数的垂向变化趋势(图 3)表明,以岩芯深度 20 m 为界线,上下两部分的砂体积分数和粒度参数截然不同:平均粒径表示沉积物颗粒分布的集中趋势,一方面受沉积介质的平均动能影响,另一方面取决于来源物质的原始颗粒大小,岩芯深度 0~20 m 段范围为 6.6~7.1 μm ;分选系数反映沉积物分选程度与沉积环境水动力条件的关系,岩芯深度 0~20 m 段范围为 1.4~1.8,属于分选较差;偏态值范围在岩芯深度 0~20 m 段集中在 1.25 左右,属于正偏;峰态用来衡量粒度频率分布曲线的尖锐程度的,岩芯深度 0~20 m 段范围为 1.9~2.3。

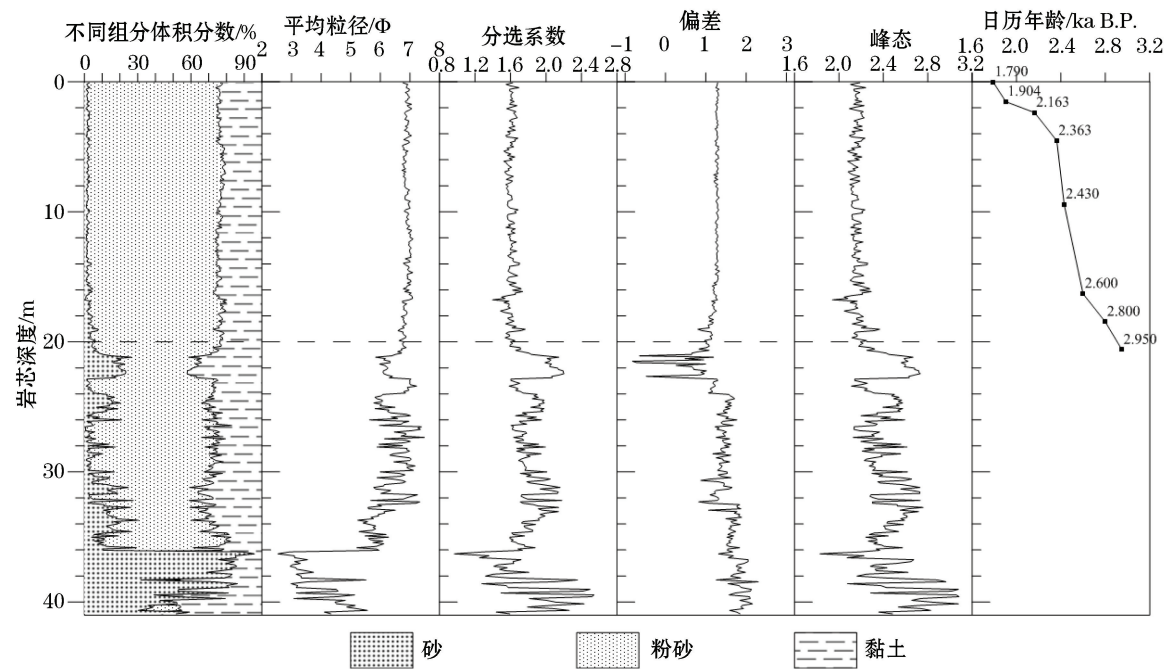


图 3 MZ05 孔粒度参数垂向分布图

Fig.3 Vertical distribution of grain-size parameters of the Core MZ05

2.3 元素含量

MZ05 孔沉积物常量元素主要由 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , TiO_2 , MnO , Na_2O , P_2O_5 组成, 微量元素主要由 Ba, Sr, V, Zn, Zr, Cr, Co, Ni, Cu, Pb 等组成, 表 2 列出 MZ05 孔常量元素和微量元素与长江、黄河以及东海沉积物平均值的对比, 可以看出 MZ05 孔沉积物的大部分常微量元素含量与长江沉积物较为接近。MZ05 孔常量元素中 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO 含量平均值与东海平均值差值大于 1, 微量元素中 Br, V, Zn, Zr 含量平均值与东海平均值差值大于 10。

表 2 MZ05 孔常、微量元素含量以及与周边区域对比 (常量元素单位为 %, 微量元素单位为 10^{-6})

Table 2 Major and trace elements compositions of the Core MZ05 and its comparison with those from ambient regions

常量元素	最大值	最小值	平均值	长江 ^[19]	黄河 ^[19]	东海 ^[19]
SiO_2	65.38	56.20	58.37	—	—	62.45
Al_2O_3	16.59	14.43	15.68	11.64	9.86	12.62
TFe_2O_3	6.73	5.77	6.05	5.49	3.35	5.12
CaO	3.45	2.73	2.97	3.06	3.88	4.34
MgO	2.78	2.43	2.65	2.91	1.84	2.27
K_2O	3.29	2.95	3.11	2.20	1.95	2.54
Na_2O	2.26	1.91	2.09	1.47	2.25	1.89
MnO	0.09	0.07	0.08	—	—	0.09
TiO_2	0.81	0.76	0.78	—	—	0.67
P_2O_5	0.14	0.12	0.13	—	—	0.12
微量元素	最大值	最小值	平均值	长江 ^[26-27]	黄河 ^[26-27]	东海 ^[19]
Ba	483.28	413.48	443.67	319.50	526.11	416.32
Sr	170.43	148.81	159.68	150.27	237.84	164.65
V	118.97	105.75	112.66	109.72	90.38	91.37
Zn	119.68	96.85	103.72	96.79	46.37	84.81
Zr	191.66	154.47	172.91	258.30	262.50	217.96
Cr	104.10	75.49	82.35	92.04	139.63	73.49
Co	16.43	14.47	15.39	49.90	29.23	14.11
Ni	47.09	35.18	37.67	33.86	21.09	33.43
Cu	37.77	14.39	16.26	40.02	13.78	25.54
Pb	39.13	22.79	25.01	28.01	19.54	26.59

注: “—”为数据缺失

3 讨 论

3.1 东亚季风指标体系

1) 东亚冬季风替代性指标

全新世晚期以来, 东海的海平面升降幅度 3~4 m, 其沉积水动力条件和沉积环境与现今情况基本相同^[28]。东海内陆架泥质区主要为受闽浙沿岸流控制的浅海沉积, 沉积物粒度与冬季沿岸流的强度成正相

关,沿岸流的强度又是由东亚冬季风的强度决定,因此沉积物粒度可以作为冬季风强度的代用指标^[29-31]。由于物源和水动力条件的不同,造成同一沉积环境中的沉积物往往受到多种机制的影响,因此,在运用沉积物的粒度数据进行古环境分析时,需要从粒度组分中分离出对某一机制敏感的粒级^[32]。目前对沉积物粒度分布进行多组分分离的数学方法包括以 Weibull 分布拟合函数法^[33]、端元粒度模型^[34-35]和粒径-标准偏差法^[36]来计算粒度组分的个数和分布范围。依靠粒级-标准偏差法得出的粒级-标准偏差变化曲线能反映不同样品的粒度含量在各粒级范围内的差异性,用以判断沉积环境的水动力条件变化^[37],故我们采用粒径-标准偏差法。

MZ05 孔的 0~20 m 沉积物 4 个敏感粒级组分(图 2b) 中较高标准偏差值分别出现在 3.3, 11.0, 37.2 和 105.1 μm , 4 个粒度组分的分界分别在 5.5, 22.1 和 74.3 μm 。粒度分析显示 $<63 \mu\text{m}$ 组分平均体积分数达 97.8%, 因此我们只考虑 63 μm 以下组分粒度反映的环境变化。研究发现长江入海泥沙均匀悬移载荷为 $<18 \mu\text{m}$, 东海陆架北部均匀悬浮载荷为 $<20 \mu\text{m}$ 之沉积物^[38], DD2 孔沉积物的敏感粒级峰值为 19 和 130 μm , 分别对应着东海冬季沿岸流和风暴流沉积动力过程^[39], 邻近的 EC2005 孔, 以 14 μm 为界线划分出粗、细两个粒度组分, 并以粒径 $<14 \mu\text{m}$ 组分的平均粒径为东亚冬季风强度的代用指标^[40]。自 7ka B.P. 的高海平面以来, 在西边界流和东亚季风驱动的复杂环流体系影响下, 东海近岸泥质区沉积物形成“夏储冬输”的宏观输运格局^[41], 冬季风增强使得更多沉积物被搬运到研究区, 结合粒度分析, 我们采用 1.2~22.1 μm 组分的平均粒径作为该孔东亚冬季风强度的代用指标。

2) 东亚夏季风替代性指标

沉积物的地球化学元素变化与其物质来源、粒度特征及沉积时的水动力条件密切相关, 气候和环境变迁影响其富集、迁移和沉积状态^[42-43]。已有研究表明东海内陆架泥质晚全新世沉积物主要来源于长江, 沉积动力格局也未出现明显变化^[44], 我们选择化学蚀变指数($\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$)、Rb/Sr 比值作为反演古气候变化的替代性指标, 化学蚀变指数 CIA 计算式中氧化物单位为摩尔分数。沉积物中 CaO 的来源包括硅酸盐矿物、碳酸盐矿物、磷酸盐矿物, 式中 CaO^* 特指由硅酸盐矿物风化产生的 CaO, 采用 McLennan^[45] 提出的校正方法计算, 即根据沉积物样品反应产物总 CaO 质量分数减去磷酸盐矿物反应产生的 CaO 质量分数(通过对反应产物中 P_2O_5 的质量分数换算可得)后与 Na_2O 质量分数作比值来计算 CIA。如果比值 ≥ 1 , 以 Na_2O 的摩尔分数代替 CaO 摩尔分数; 若比值 < 1 , 则直接以 CaO 摩尔分数来计算 CIA。源岩在化学风化过程中, 其碱性元素(Ca, Na, K) 经淋溶后大为降低, 使风化产物的 CIA 值增大^[46-48], 反映了环境气候的温暖潮湿。Rb 和 Sr 都是典型的分散元素, 在自然界中常以类质同像的形式分布于各类矿物中, Rb 主要分散在含 K 的矿物中, 如黑云母、钾长石等, Sr 的离子半径与 Ca 相近, 容易进入富 Ca 矿物中, 如硅酸盐和碳酸盐^[49-50]。由于 Sr 的离子半径较小, 活动性比 Rb 强, 并且不容易被吸附^[51], 容易被淋溶迁移, 从而导致陆源碎屑物质 Sr 元素减少, 所以主要受控于夏季风降水的源区化学风化作用强弱变化影响着海洋沉积物中 Rb/Sr 比值的增减。

3.2 东亚季风演化历史重建

根据地球化学元素参数的变化趋势(图 4), MZ05 孔沉积物反映的源区风化强度大致可以分为 3 个阶段, 1) 自 2.90ka B.P. 始, CIA 与 Rb/Sr 比值均呈现逐渐增大, 指示沉积物源区的化学风化作用逐渐增强, 在 2.70ka B.P. 之后出现持续时间大约 70 a 的弱风化期。2) 2.64—2.35ka B.P., Rb/Sr 比值在 2.64—2.50ka B.P. 逐渐减小, 反映源区化学风化强度减弱; 2.50—2.35ka B.P., CIA 与 Rb/Sr 比值反映源区化学风化强度在本阶段波动频繁且呈不断减弱的趋势。Rb/Sr 比值在 2.39ka B.P. 左右短暂增大, 但在 CIA 曲线上却表现得无明显。3) 2.35—1.80ka B.P., CIA, Rb/Sr 比值曲线对应性较好, 识别出发生在 2.15—2.00ka B.P. 的强化学风化期。沉积物源区的化学风化强弱与东亚夏季风带来的降水密切相关, 利用海洋沉积物的化学风化指标来反映季风降水, 进而推断区域夏季风演化的研究工作取得的成果证明了此类指标应用的可行性^[52-54]。我们认为 MZ05 孔沉积物地球化学元素参数指示的源区 2.90—2.70ka B.P. 和 2.15—2.00ka B.P. 化学风化作用增强

和 2.50—2.35ka B.P. 化学风化作用减弱, 可能对应着同时期研究区东亚夏季风的强弱变化。

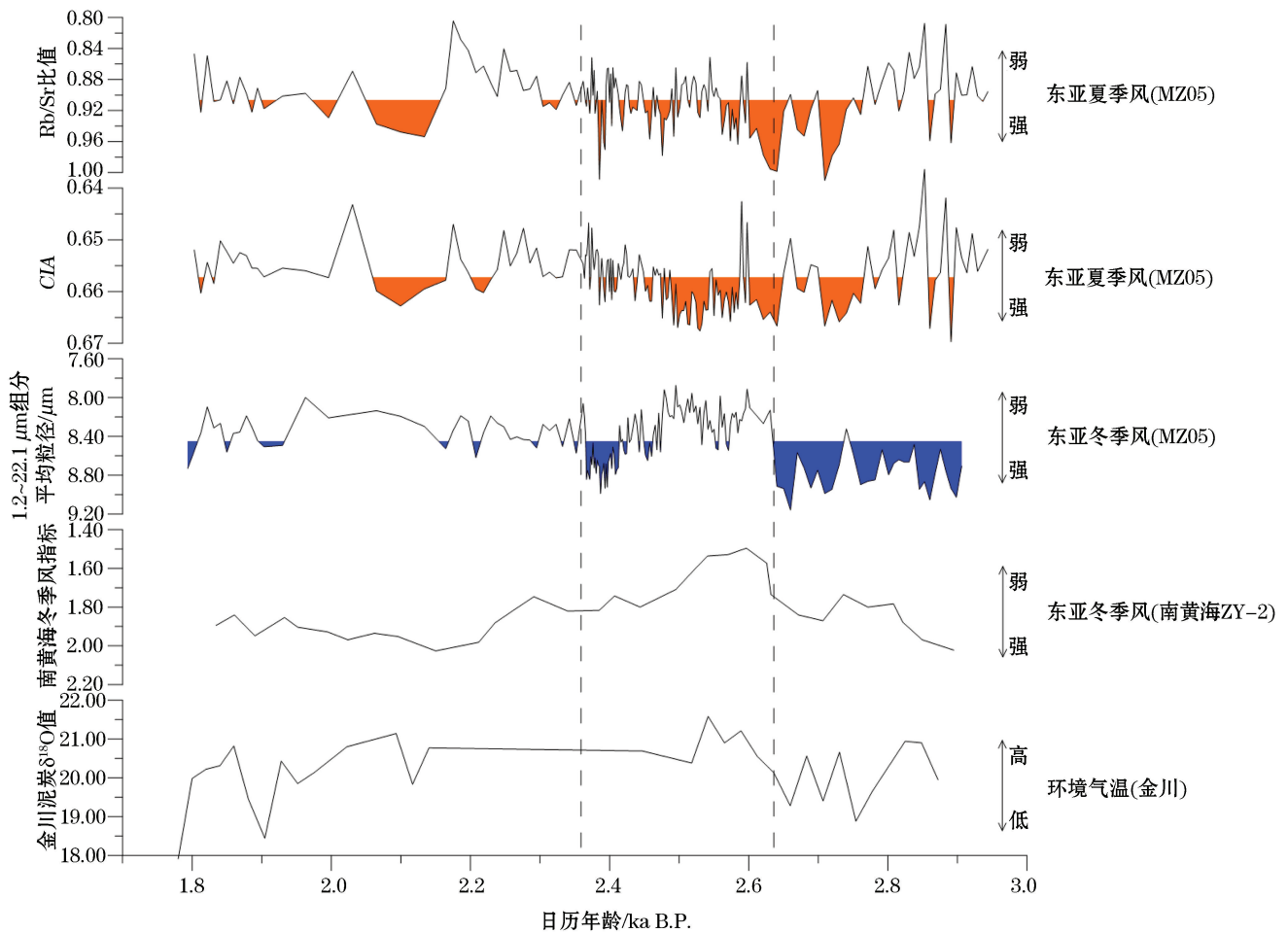


图4 MZ05 孔敏感粒径与 CIA、Rb/Sr 比值指标演化趋势

Fig.4 Evolution processes of mean grain size, CIA and Rb/Sr of the Core MZ05

东海内陆架泥质区的沉积物搬运主要受控于东亚冬季风, 因此沉积物粒度的变化可以反映冬季风强弱变化, 根据粒度参数变化特征将其分为 3 个阶段(图 4)。

2.65ka B.P.之前, MZ05 孔沉积物敏感粒度组分(1.16~22.10 μm)平均粒径值在 2.90—2.70ka B.P.较大但具有减小的趋势, 反映 2.90—2.70ka B.P.东亚冬季风处于强盛期但具减弱趋势; 2.70—2.65ka B.P. 沉积物敏感粒度组分(1.16~22.10 μm)平均粒径值较大, 表明 2.70—2.65ka B.P.为东亚冬季风增强期。时间上和根据北大洋冰筏碎屑记录建立的寒冷事件 Holocene Event 2 相吻合^[55]。Yu^[56]对金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行指标逆模拟(IPM)后, 得出 6ka B.P.以后中国东北地区环境温度随时间变化曲线, 发现 2.90—2.65ka B.P.的环境温度低于平均值, 指示环境寒冷。吉林大布苏湖自 3.60ka B.P.开始湖面呈波动式下降, 2.70ka B.P.以后湖泊开始萎缩, 表明地区降水量减少, 气候逐渐干燥^[57]。冲绳海槽地区岩芯记录的 4.60—2.70ka B.P.普林虫低值事件^[58], 反映当时的海水表层水温较低, 推测可能与东亚冬季风的加强有关。西辽河流域的古生态证据表明孢粉类型 *Chenopodiaceae* 与 *Artemisia* 比值在 2.90—2.60ka B.P.显著上升, 指示环境干旱程度增加^[59]。与 MZ05 孔邻近的 EC2005^[60]孔粒度资料也显示 3.30—2.70ka B.P.为东亚冬季风强盛期。本阶段与全球不同地区都有迹可循的“2.8ka B.P.冷事件”在年代上大体相当。作为晚全新世比较强的一次气候变动, Bond 等^[55]通过对北大西洋深海沉积物中冰筏碎屑的研究, 首先发现“2.8ka B.P.冷事件”, 后来又得到了一系列古环境资料^[61-63]和史料^[64]的证实。关于此次冷事件的成因, Renssen 等^[65]利用海气耦合模式研究太阳

辐照度变化对地球气候的影响,发现太阳辐照度变化可能会影响海洋环流,进而造成气候突变。Solanki 等通过树轮年表序列记录的大气放射性碳水平 $\Delta^{14}\text{C}$ 短期的变化反演太阳活动变化,在 2.70ka B.P.时太阳黑子数显示为低值^[66],太阳总辐射量较低,反映到地球端表现为地表气温下降^[67]。

2.65—2.35ka B.P. MZ05 孔沉积物粒度指标整体呈增强趋势波动频繁,可进一步细分为 2 阶段:2.65—2.50ka B.P.的较弱期和 2.50—2.37ka B.P.渐强期。1)2.65—2.50ka B.P.,MZ05 孔敏感粒级组分(1.16~22.10 μm)平均粒径值波动幅度较大且随时间逐渐减小,反映这一时期冬季风处于较弱阶段,2.55ka B.P.左右为本阶段的冬季风较强期,在其他气候记录中均有广泛反映,树轮 $\Delta^{14}\text{C}$ ^[66]数据显示在 2.55ka B.P.太阳活动处于较为明显的弱期,金川泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ 值记录也表明此时中国东北地区地表湿度相对较低,环境较为干燥^[56]。2)2.50—2.35ka B.P.,MZ05 孔粒度资料反映东亚冬季风不断增强,在 2.40ka B.P.达到最强,本次冷事件虽然在金川泥炭气候记录中没有得到体现,但在南黄海(图 4)^[20]、北京石花洞石笋^[68]气候记录中均有明显的反映,气候区域性差异可能是由用来气候重建的代用指标之间存在的指示差异造成,2.40ka B.P.冷事件的存在表明当时的环境气候存在冷暖波动且不断变冷,反映相对温暖的历史时期中气候也存在冷暖变化。

2.35—1.80ka B.P.为整个记录中较为温暖的时期,但也存在 2 次较为明显的冬季风增强事件,分别发生在 2.20ka B.P.和 1.90ka B.P.左右,东海北部的 PC-6 孔^[23]粒度资料指示的冬季风变化历史中,2.28ka B.P.和 1.88ka B.P.左右为 2 个冬季风强盛期,与我们平均粒径变化曲线显示的东亚冬季风较强期相对应。本时期的东亚冬季风变化可以分为 2 个阶段:1)2.35—1.95ka B.P.,MZ05 孔粒度资料显示东亚冬季风强度呈较小幅度的波动变化,2.20ka B.P.左右的东亚冬季风增强虽然持续时间较短、降温幅度较小,但在许多古气候资料中都有所保存^[20,23,37]。2.10—1.95ka B.P.东亚冬季风整体较弱且较为稳定,中国历史文献记录表明此时间段是温暖时期,对应于汉朝温暖期^[69]。2)1.95ka B.P.之后,东亚冬季风强度有所增加,位于南黄海的 ZY-2 孔(图 4)粒度资料记录的东亚冬季风在 2.20—1.80ka B.P.为增强趋势^[20],来自济州岛西南泥质区的 B2 孔气候指标也表明在 1.90—1.61ka B.P.(50—340 AD)冬季风相对较强盛^[37],巴里坤湖全新世沉积物记录显示在 1.90ka B.P.时环境气候表现为由暖干向冷(凉)湿转变^[70],金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示环境温度在 1.90ka B.P.存在一个明显低值(图 4)。

已有研究表明东亚冬季风强度与太阳黑子数存在明显的反相关系^[71],Ge 通过对不同地区气候指标的对比,发现冷期时东亚冬季风与东亚夏季风呈负相关,暖期时则呈正相关^[72]。数值模拟的结果也显示在全球偏冷时期,东亚冬夏季风具有相反的关系,而在全球偏暖时期二者具有同步的关系^[73]。王邵武等提出东亚冬夏季风变化之间的关系主要依赖于不同时间尺度季风变化的物理原因与机制,而不能笼统地说东亚冬夏季风变化是反位相^[74]。已有大量研究表明^[75-78],中国大部分地区气温在全新世晚期呈降低趋势,通过对比反映源区夏季风强度变化的化学风化指标与反映冬季风强弱变化的粒度指标后,我们发现 1)2.90—2.64ka B.P.阶段中,2.90—2.70ka B.P.地球化学元素指标显示源区的化学风化作用呈增强趋势,对应着东亚夏季风的逐渐增强,而平均粒径指示的东亚冬季风在此期间呈减弱趋势;2.70—2.64ka B.P.源区的化学风化作用较弱,表明本阶段东亚夏季风强度较小,平均粒径曲线显示 2.70—2.64ka B.P.东亚冬季风较强。2)2.50—2.35ka B.P.阶段中,Rb/Sr 比值和化学蚀变指数(CIA)显示本阶段源区的化学风化作用逐渐减弱,对应着东亚夏季风的逐渐减弱;粒度资料显示同时期的东亚冬季风逐渐增强。3)2.15—2.00ka B.P.地球化学指标显示源区化学风化强度逐渐增强,对应着东亚夏季风强度逐渐增大;平均粒径指示的东亚冬季风强度则逐渐减弱。综上所述,对比 MZ05 孔的地球化学指标和粒度指标之后发现晚全新世时期中国东部地区的东亚冬夏季风在百年尺度上呈现反相变化。

4 结 论

我们以沉积物敏感粒级为替代性指标,尝试恢复东海内陆架泥质区全新世末期季风演变过程,表征沉积物源区风化强度的 CIA, Ba/Sr 比值变化曲线具有很好的对应,2.90—1.80ka B.P.的沉积物源区化学风化强

弱变化可以分为 3 个阶段:2.90—2.70ka B.P.的渐强期;2.64—2.35ka B.P.波动频繁的渐弱期和 2.30—1.80 ka B.P.的较弱风化期。

MZ05 孔的粒度指标记录的 2.90—1.80ka B.P.东亚冬季风强弱变化,2.90—2.64ka B.P.的东亚冬季风可以进一步细分为 2.90—2.70ka B.P.的渐弱期,2.70—2.64ka B.P.的增强期;2.64—2.35ka B.P.的东亚冬季风包括 2.64—2.50ka B.P.的较弱期和 2.50—2.35ka B.P.的增强期;2.35—1.80ka B.P.冬季风整体较弱。其中 2.70ka B.P.的冷事件是最重要的气候转折,标志着气候由之前的偏冷干转变为偏暖湿,在其他气候记录中也存在相似的变化,证明这次气候突变是全球性的。2.40ka B.P.的冷事件在金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录中没有体现,但在其他气候材料中有所体现,此次冷事件的内部细节在高分辨率的年龄框架下相当明显。同时通过对比化学风化指标与粒度指标后,发现晚全新世时期中国东部地区的东亚冬夏季风在百年尺度上呈现反相变化。

参考文献(References):

- [1] LIU J P, MILLIMAN J D, GAO S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 45-67.
- [2] DAVID J D, MCKEE B A, NITTROUER C A, et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1): 143-158.
- [3] LIU J P, XU K H, LI A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3): 208-224.
- [4] MCKEE B A, NITTROUER C A, DEMASTER D J. Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River[J]. *Geology*, 1983, 11(11): 631-633.
- [5] NITTROUER C A, DEMASTER D J, MCKEE B A. Fine-scale stratigraphy in proximal and distal deposits of sediment dispersal systems in the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 1984, 61(1): 13-24.
- [6] SHI X F, LIU S F, QIAO S Q, et al. Depositional features and palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 23(4): 19-30. 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 23(4): 19-30.
- [7] SHI X F, HU L M, QIAO S Q, et al. Progress in research of sedimentary organic carbon in the East China Sea: sources, dispersal and sequestration[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(3): 313-327. 石学法, 胡利民, 乔淑卿, 等. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(3): 313-327.
- [8] LIU J P, LI A C, XU K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17): 2141-2156.
- [9] ZHANG X, JIN L, LI N. Asynchronous variation in the East Asian winter monsoon during the Holocene[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(11): 5357-5370.
- [10] WU X H, AN Z S, WANG S M, et al. The temporal and spatial variation of East Asian Summer monsoon in Holocene Optimum in China[J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 14(1): 24-37. 吴锡浩, 安芷生, 王苏民, 等. 中国全新世气候适宜期东亚夏季风时空变迁[J]. *第四纪研究*, 1994, 14(1): 24-37.
- [11] AN Z, KUKLA G J, PORTER S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130, 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [12] AN Z S, LIU X D. History and variability of East Asian monsoon climate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 238. 安芷生, 刘晓东. 东亚季风气候的历史与变率[J]. *科学通报*, 2000, 45(3): 238.
- [13] CHENG H, AI S B, WANG X F, et al. Oxygen isotope records of stalagmites from southern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 157-163. 程海, 艾思本, 王先锋, 等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 157-163.
- [14] THOMPSON L G, MOSLEY-THOMPSON E, DAVIS M E, et al. Holocene-late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science*, 1989, 246(4929): 474-477.
- [15] HONG Y T, JIANG H B, LIU T S, et al. Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose[J]. *The Holocene*, 2000, 10(1): 1-7.
- [16] LI S, YONG W, XING Q L, et al. A 16 ka climate record deduced from $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratio in Qinghai Lake sediments, northeastern

- Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24(2): 103-110.
- [17] FENG X, CUI H, TANG K, et al. Tree-ring δD as an indicator of Asian monsoon intensity[J]. Quaternary Research, 1999, 51(3): 262-266.
- [18] PENG Y, XIAO J, NAKAMURA T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(3): 467-479.
- [19] SHI X F, LIU S F, QIAO S Q, et al. Geochemical characteristics, controlling factor and record of paleoclimate in sediments from East China Seas[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(5): 883-894. 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 中国东部近海沉积物地球化学: 分布特征, 控制因素与古气候记录[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(5): 883-894.
- [20] HU B Q, YANG Z S, ZHAO M X, et al. Grain size records reveal variability of the East Asian Winter Monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area, China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2012, 55(10): 1568-1581. 胡邦琦, 杨作升, 赵美训, 等. 南黄海中部泥质区 7200 年以来东亚冬季风变化的沉积记录[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 55(10): 1568-1581.
- [21] LIU S F, SHI X F, LIU Y G, et al. Recent 2000 a climatic record of mud area on the inner shelf of the East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(3): 85-93. 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 近 2ka 以来东海内陆架泥质区记录的高分辨率古气候演化[J]. 海洋学报, 2011, 33(3): 85-93.
- [22] WANG L, SAMTHEIN M, ERLKENKEUSER H, et al. Holocene variations in Asian monsoon moisture: A bi-decadal sediment record from the South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(18): 2889-2892.
- [23] XIAO S B, LI A C, CHEN M H, et al. Recent 8 ka mud records of the East Asian winter monsoon from the inner shelf of the East China Sea[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(5): 573-581. 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近 8ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(5): 573-581.
- [24] REIMER P J, BARDE E, BAYLISS A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP[J]. Radiocarbon, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [25] YONEDA M, UNO H, SHIBATA Y, et al. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 259: 432-437.
- [26] LIU M, FAN D J. Comparison of the element compositions between the sediments entered into the seas from the Changjiang and the Huanghe Rivers[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 42-50. 刘明, 范德江. 长江、黄河入海沉积物中元素组成的对比[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 42-50.
- [27] YANG S Y, LI C X. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow river sediments and their geological background[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(2): 19-26. 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19-26.
- [28] LIU J P, LI A C, XU K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17): 2141-2156.
- [29] XIAO S B, LI A C, JIANG F Q, et al. Recent 2 ka Mud record from the inner shelf of the East China Sea and its climate significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(21): 2233-2238. 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义[J]. 科学通报, 2004, 49(21): 2233-2238.
- [30] LIU S F, SHI X F, LIU Y G, et al. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14): 1387-1396. 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 中全新世以来东亚冬季风的东海内陆架泥质沉积记录[J]. 科学通报, 2010, 55(14): 1387-1396.
- [31] SUN X Y, LI G X, LIU Y, et al. Response of environmental sensitive grain size group in Core FJ04 from mud area in the north of East China Sea to the East Asian winter monsoon evolution[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 13(2): 11-17. 孙晓燕, 李广雪, 刘勇, 等. 东海北部泥质区敏感粒度组分对东亚季风演变的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 13(2): 11-17.
- [32] YANG Z S, CHEN X H. Centennial high resolution records of sediment grain size variation in the mud area of the Changjiang estuary and its influential factors[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 690-699. 杨作升, 陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 690-699.
- [33] SUN D, BLOEMENDAL J, REA D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(3): 263-277.
- [34] PRINS M A, POSTMA G, WELTJE G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope[J]. Marine Geology, 2000, 169(3): 351-371.
- [35] PRINS M A, BOUWER L M, BEETS C J, et al. Ocean circulation and iceberg discharge in the glacial North Atlantic: Inferences from

- unmixing of sediment size distributions[J]. *Geology*, 2002, 30(6): 555-558.
- [36] BOULAY S, COLIN C, TRENTESAUX A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 2003, 184(211): 1-21.
- [37] XIANG R, YANG Z S, GUO Z G, et al. East Asian winter monsoon change recorded by environmentally sensitive grain-size components in the muddy area of southwest Jeju Island in recent 2300 years[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2006, 36(7): 654-662. 向荣, 杨作升, 郭志刚, 等. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(7): 654-662.
- [38] FAN D J, YANG Z S, SUN X G, et al. Quantitative evaluation of sediment provenance on the north area of the East China Sea shelf[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2002, 32(5): 748-756. 范德江, 杨作升, 孙效功, 等. 东海陆架北部长江, 黄河沉积物影响范围的定量估算[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(5): 748-756.
- [39] XIAO S B, LI A C. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 31(3): 95-102. 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122-129.
- [40] XU F J, LI A C, WAN S M, et al. The geological significance of environmental sensitive grain-size populations in the mud wedge of the East China Sea during the mid-Holocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(3): 95-102. 徐方建, 李安春, 万世明, 等. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 95-102.
- [41] GE Q, LIU J P, CHU F Y, et al. The records of the East Asian monsoon from mud area on the East China Sea shelf since the Holocene sea-level highstand[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(7): 101-106. 葛倩, 刘敬亩, 初凤友, 等. 全新世高海面以来东海陆架泥质沉积的东亚季风记录[J]. *海洋科学*, 2011, 35(7): 101-106.
- [42] ZHAO H Q, HAN X B, CHEN R H, et al. Characteristics of main elements and their palaeoenvironment significance of Core 191 in the northern South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2008, 30(6): 85-93. 赵宏樵, 韩喜彬, 陈荣华, 等. 南海北部 191 柱状沉积物主元素特征及其古环境意义[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 85-93.
- [43] GUO Z G, YANG Z S. Study on comparison sedimentary geochemistry of mud area on East China Sea Continental Shelf[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 284-289. 郭志刚, 杨作升. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究[J]. *沉积学报*, 2000, 18(2): 284-289.
- [44] XU F J, LI A C, HUANG J L. Research progress in the mud deposits along the Zhe-Min coast of the East China Sea continental shelf[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(1): 97-104. 徐方建, 李安春, 黄敬利. 东海陆架浙-闽沿岸泥质沉积研究进展[J]. *海洋通报*, 2012, 31(1): 97-104.
- [45] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [46] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [47] FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleo weathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [48] LIU S, SHI X, LIU Y, et al. Environmental record from the mud area on the inner continental shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 30(4): 43-52.
- [49] GUO E, GAO M S, HOU G H, et al. Geochemical characteristics of sediment in Core 07 since the late Pleistocene in Laizhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(3): 145-155. 郭飞, 高茂生, 侯国华, 等. 莱州湾 07 钻孔沉积物晚更新世以来的元素地球化学特征[J]. *海洋学报*, 2016, 38(3): 145-155.
- [50] FAN D J, YANG Z S, MAO D, et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow rivers[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12. 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中黏土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12.
- [51] SHEN H Y, JIA Y L, LI X S, et al. Environmental change inferred from distribution of Rb and Sr in different grain size fractions from lacustrine sediments in Huangqihai Lake, inner Mongolia[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 61(3): 1208-1217.
- [52] JIN H Y, JIAN Z M, XIE X, et al. Late Quaternary East Asian monsoonal evolution recorded by high resolution elemental ratios in the northern South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 207-215. 金海燕, 翦知潜, 谢昕, 等. 南海北部晚第四纪高分辨率元素比值反映的东亚季风演变[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(2): 207-215.
- [53] MEI X, LI R H, ZHANG X H. Characteristics of Rb/Zr ratio of DLC70-3 Core from South Yellow Sea and its environmental implication since late Pleistocene[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(2): 10-17. 梅西, 李日辉, 张训华. 南黄海 DLC70-3 孔晚更新世以来 Rb/Zr 值特征及环境意义[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(2): 10-17.
- [54] LIU Z F, ZHAO Y L, WANG Y J, et al. Clay mineralogical proxy of the East Asian monsoon evolution during the Quaternary in the South China Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(5): 921-933. 刘志飞, 赵玉龙, 王铁婕, 等. 南海第四纪东亚季风演化的黏土矿物

- 指标[J]. 第四纪研究, 2017, 37(5): 921-933.
- [55] BOND G, SHOWERS W, CHESEBY M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- [56] YU S Y. Quantitative reconstruction of mid- to late-Holocene climate in NE China from peat cellulose stable oxygen and carbon isotope records and mechanistic models[J]. *Holocene*, 2013, 23(11): 1507-1516.
- [57] JIE D M, LU J F, LI Z M, et al. Carbonate content of sedimentary core and holocene lake-level fluctuation of Dabusu Lake[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(2): 77-82. 介冬梅, 吕金福, 李志民, 等. 大布苏湖全新世沉积岩芯的碳酸盐含量与湖面波动[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(2): 77-82.
- [58] JIAN Z, WANG P, SAITO Y, et al. Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2000, 184(1): 305-319.
- [59] LI Y Y, WILLIS K J, ZHOU L P, et al. The impact of ancient civilization on the northeastern Chinese landscape: Palaeoecological evidence from the Western Liaohe River Basin, Inner Mongolia[J]. *Holocene*, 2006, 16(8): 1109.
- [60] XU F, LI A, XU K, et al. Cold event at 5 500 a BP recorded in mud sediments on the inner shelf of the East China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 975-984.
- [61] BOOTH R K, JACKSON S T. A high-resolution record of late-Holocene moisture variability from a Michigan raised bog, USA [J]. *Holocene*, 2003, 13: 863-876.
- [62] WANG S W, ZHU J H. Studies of Chronology of millennial time scale climate oscillations in the Holocene[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(4): 157-160. 王绍武, 朱锦红. 全新世千年尺度气候振荡的年代学研究[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(4): 157-160.
- [63] ZHOU J, WANG S M, YANG G S. Younger Dryas Event and cold events in Early-Mid Holocene: record from the sediment of Erhai Lake[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(3): 127-130. 周静, 王苏民, 杨桂山. 新仙女木事件及全新世早中期降温事件——来自洱海湖泊沉积的记录[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 127-130.
- [64] WANG S W, HUANG J B, WEN X Y, et al. Evidence and simulation of drought in China during 4-2 ka BP[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(20): 2428-2433. 王绍武, 黄建斌, 闻新宇, 等. 4—2 ka BP 中国干旱的证据和模拟研究[J]. *科学通报*, 2007, 52(20): 2428-2433.
- [65] RENSSEN H, GOOSSE H, MUSCHELER R. Coupled climate model simulation of Holocene cooling events: solar forcing triggers oceanic feedback [J]. *Climate Past Discuss*, 2006, 2(2): 209-232.
- [66] SOLANKI S K, USOSKIN I G, KROMER B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years[J]. *Nature*, 2004, 431(7012): 1084-1087.
- [67] HONG Y T. Progress in study on relationships between solar variability and climate change[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 14(4): 400-405. 洪业汤. 太阳变化驱动气候变化研究进展[J]. *地球科学进展*, 2000, 14(4): 400-405.
- [68] TAN M, LIU T, HOU J, et al. Cyclic rapid warming on centennial scale revealed by a 2650 year stalagmite record of warm season temperature[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 11-19.
- [69] ZHU K Z. A preliminary study of climate change in China in the past 5,000 Years[J]. *Acta Archaeologica Sinica*, 1972 (1): 15-38. 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. *考古学报*, 1972 (1): 15-38.
- [70] XUE J B, ZHONG W, ZHAO Y J, et al. Holocene climatic instability recorded by a lake sediment section in Northeast Xinjiang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 648-656. 薛积彬, 钟巍, 赵引娟, 等. 东疆北部全新世气候不稳定性的湖泊沉积记录[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 648-656.
- [71] XIAO S, LI A, LIU J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237(2): 293-304.
- [72] GE Q, XUE Z, YAO Z, et al. Anti-phase relationship between the East Asian winter monsoon and summer monsoon during the Holocene? [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(2): 175-183.
- [73] ZHOU B T, ZHAO P. Inverse correlation between ancient winter and summer monsoons in East Asia? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(20): 3760-3767. 周波涛, 赵平. 古东亚冬季风和夏季风反位相变化吗? [J]. *科学通报*, 2009, 54(20): 3760-3767.
- [74] WANG S W, WEN X Y, HUANG J B. Are the changes of Winter and Summer Monsoon over East Asia out of phase? [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(3): 231-233. 王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 东亚冬季风和夏季风变化反位相吗? [J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 231-233.
- [75] XIU G L, FANG X Q. Characteristics of Holocene temperature change in China[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1075-1080. 侯光良, 方修琦. 中国全新世气温变化特征[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(9): 1075-1080.

- [76] JIANG Q F, JI J F, SHEN J, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly-dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 56(2): 243-255. 蒋庆丰, 季峻峰, 沈吉, 等. 赛里木湖孢粉记录的亚洲内陆西风区全新世植被与气候变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 56(2): 243-255.
- [77] LI Z W, LI B S, SUN L, et al. Paleontological evidence of the changes of the north boundary of southern mid-Subtropical zone in Eastern China during Holocene[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(2): 179-185. 李志文, 李保生, 孙丽, 等. 全新世中国东部亚热带地区气候变迁的古生物学证据[J]. *热带地理*, 2015, 35(2): 179-185.
- [78] XUE J B, ZHONG W. Holocene climate variation denoted by Barkol Lake sediments in northeastern Xinjiang and its possible linkage to the high and low latitude climates[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2011, 41(1): 61-73. 薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世气候环境变化与高低纬间气候变化的关联[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(1): 61-73.

High-resolution Sedimentary Record of East Asian Monsoon During Late Holocene: Evidence From the Inner Shelf Mud Area of East China Sea

XU Jun^{1,2,3}, SHI Xue-fa^{1,2,3}, LIU Sheng-fa^{1,2,3}, LIU Jian-xing^{1,2,3}, SHAN Xin^{1,2,3}, DONG Zhi^{1,4}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;*

4. *The Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Geographic and Oceanographic Sciences School of Nanjing University, Nanjing 210023, China)*

Abstract: High resolution records of grain size and geochemical compositions of the Core MZ05 from the inner shelf mud wedge of the East China Sea (ECS) were obtained. After comparing two Geochemical index (CIA and Rb/Sr) of the Core MZ05, this study indicated that the chemical weathering activity of source area was gradually strengthened during 2.90–2.70ka B.P., and weakened at 2.64–2.35ka B.P. and 2.35–1.80ka B.P. All these fluctuations reflect the variations of intensity of the East Asian summer monsoon (EASM) during the late Holocene. And, the mean grain-size of fine sections (1.2~22.1 μm) of the Core MZ05 indicates the frequent fluctuations of East Asian winter monsoon (EAWM) during late Holocene, i.e., strong and moderate fluctuation frequency during 2.90–2.64ka B.P., suddenly weakened around 2.64ka B.P., gradually strengthened during 2.60–2.35ka B.P., and relatively stable and weakened during 2.35–1.82ka B.P. These strengthened winter monsoon events indicated by mean grain-size of the Core MZ05 are also supported by comparable climate proxies, showing regional responses to global changes. Finally, we suggested that the EAWM in the study area has an anti-phase relationship with the EASM at the centennial scale during the late Holocene.

Keywords: grain size; chemical weathering; high resolution; East Asian monsoon; mud area; East China Sea

Received: December 25, 2017